

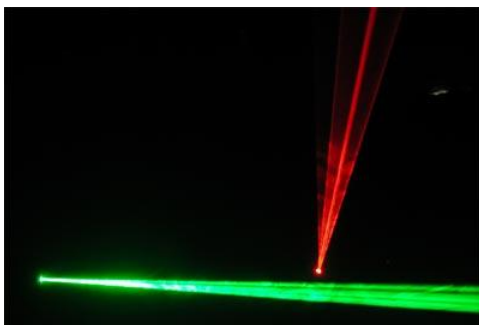
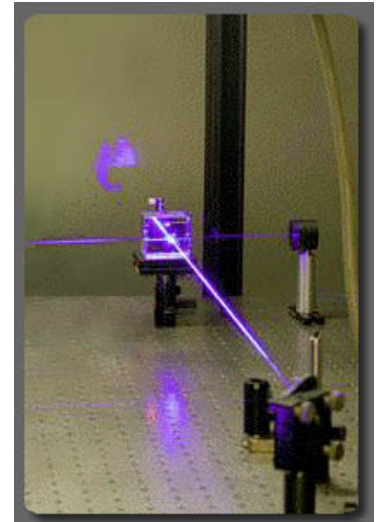
## Mål selv lysets fart

(Samlet pris fra ca. 3500 kr., excl. PC)

### Motivation:

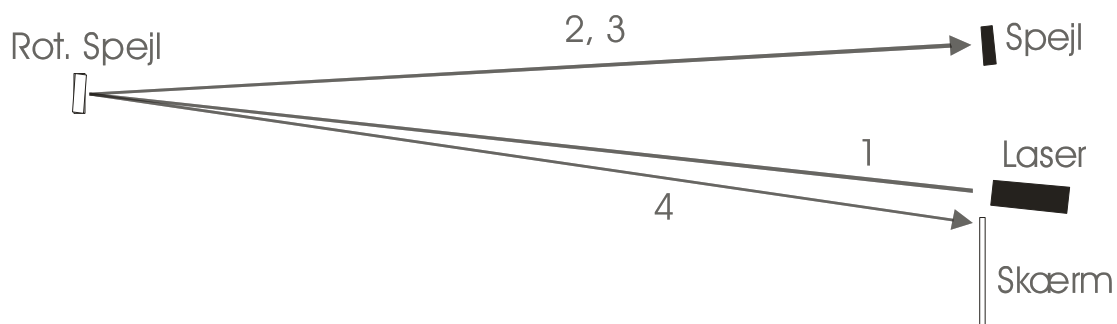
Det er som bekendt en af de to hjørnesteen i den specielle relativitetsteori at lysets fart,  $c$ , er konstant og endelig for alle observatører. En af årsagerne til at de relativistiske effekter ikke griber afgørende ind i vores dagligdag er at lysets fart dog er uhyre høj. Dette gør også målingen af  $c$  til et lidt krævende eksperiment, men ikke sværere end at f.eks. en omhyggelig gymnasieelev kan gennemføre en måling med en præcision på nogle få procent indenfor 3-4 timer.

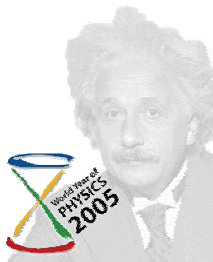
Eksperimentet har rødder fra årene 1850-1878 hvor først Foucault



og derefter Michelson bestemte lysets fart ved lignende metoder. Princippet er ganske simpelt: Man sender lys fra en laser (1) mod et roterende spejl hvorfra det sendes videre (2) til et andet spejl der kaster lyset tilbage (3). På grund af lysets udbredelsesfart tager det et vist tidsrum

for det at vende tilbage til det roterende spejl. I dette tidsrum har spejlet roteret en (lille) vinkel hvorfor lyset ikke længere returneres (4) til den oprindelige kilde, men til en skærm hvorpå forskydningen kan registreres. Kender man rotationshastigheden for det roterende spejl og afstandene kan lysets fart bestemmes. En skitse af den principielle opstilling er vist i figur 1.





### Stykliste:

1. Frekvensmåler (Denne datalogger kan desuden mange andre ting, ca. 900 kr., <http://www.drdaq.dk/>)
2. Overfræser (fra ca. 200 kr., fås i byggemarkeder)
3. Linse, brændvidde 5000 mm (ca. 1000 kr., <http://www.leybold-didactic.com>)
4. Transformator (variotransformer, fra ca. 500 kr., feks. [www.rsonline.dk](http://www.rsonline.dk))
5. To små plane spejle + lim (100 kr.)
6. Et stort plant spejl (ca. 200 kr.)
7. Faststof-laser (Laser-vaterpas eller -pegepind, ca. 200 kr., fås mange steder på nettet)
8. Stråledeler (fra ca. 220 kr., [http://www.casix.com/product/Beamsplitter\\_FBS.htm](http://www.casix.com/product/Beamsplitter_FBS.htm))
9. Web-kamera (fra ca. 200 kr.)
10. PC (har de fleste)
11. Diverse holdere, feks. skruetvinger, kan være nyttige
12. Et lokale med 2x15 m fri plads som kan mørklægges

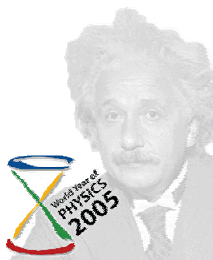
### Advarsel:

Der indgår flere elementer i øvelsen hvor man ved tilstrækkelig skødesløshed kan komme til skade, feks. laseren eller overfræseren. Jeg har forsøgt at udpege de farlige elementer, men jeg påtager mig intet ansvar for eventuelle følger af udførelsen af det beskrevne eksperiment.

### Forberedelse:

Installer web-kamera og DrDAQ efter forskrifterne på din PC. Lim de to små spejle på omdrejningsakslen på overfræseren – det er vigtigt at de sidder godt fast og at de er parallelle. Afskærm overfræseren så man ikke umiddelbart kan sætte fingrene ind i roterende dele, men lad en åbning på ca. 20 grader være fri på den ene side. I stedet for en overfræser med konstant omdrejningsfrekvens kombineret med en variotransformer kan man de fleste steder købe en overfræser med variabel omdrejningsfrekvens, min. 25.000 omdr./min. Totalprisen er næsten den samme.

Hvis du har købt et laservaterpas, f.eks. Black&Decker, LZR3, kan det være nødvendigt at fjerne den lille, klare plastdys indeni der udbreder laserstrålen. Herefter kan laseren være farlig for øjnene, dvs. med et output over 1 mW (klasse III). Ligeledes for en laserpegepind – der er mange i handelen med udgangseffekt langt over 1 mW. Hvis din laser er på over 1 mW anbefales det

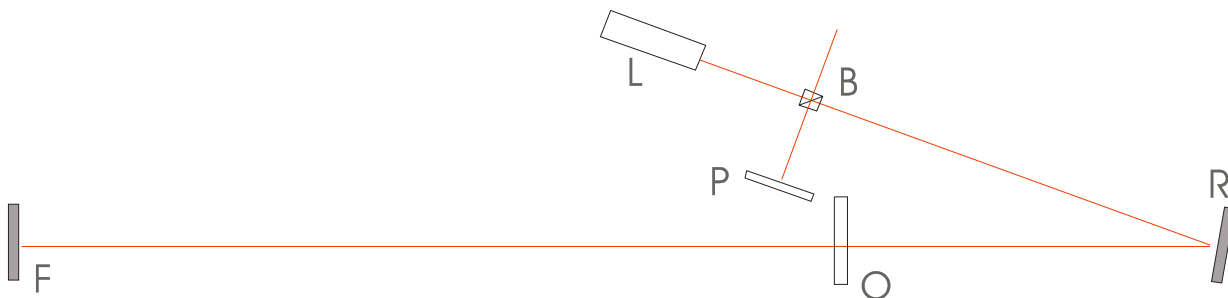


kraftigt at du monterer en dæmper ([http://www.casix.com/product/Filter\\_NDG.htm](http://www.casix.com/product/Filter_NDG.htm), ca. 50 kr.).

Det er ikke nødvendigt med mere end 1 mW for at udføre målingen.

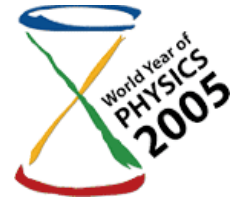
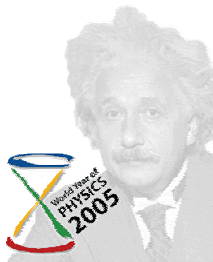
### Udførelse:

Den ønskede opstilling er vist i figur 2. Her illustreres (skematisk, ikke målfast) laseren  $L$ , beam-splitteren,  $B$ , det roterende spejl,  $R$ , en optisk linse,  $O$ , det faste spejl,  $F$  og den positionsfølsomme lysdetektor,  $P$ . Afstanden mellem  $L$  og  $B$  kaldes i det følgende  $d_{LB}$  og så fremdeles. Brændvidden på den optiske linse er 5000 mm. For at opnå et rimeligt kompromis mellem lysmængden og flytningen af laserpletten på  $P$  kan det vises at afstandene skal være:  $d_{LR} = 5.00 \text{ m} = d_{RO} = 5.00 \text{ m}$ ,  $d_{OF} = 10.00 \text{ m}$ , hvorimod afstanden  $d_{LB}$  stort set er underordnet, men kan vælges til feks. 0.5 m (og  $d_{PB} = d_{LB}$ ).



Fremgangsmåden under opstillingen og opliniering af linser og spejle er at begynde fra laseren og følge lyspletten til det roterende spejl, derfra til linsen og videre til det faste spejl. Fokuser evt. laseren på det roterende spejl. Det roterende spejl i overfræseren kan indstilles manuelt, men husk at koble strømmen fra først (så andre ikke kommer til at tænde). Spejle og linsen stilles således at lyspletten rammer/passerer nogenlunde på/igennem centrum.

Herefter indstilles det faste spejl således at den reflekterede stråle (3) løber tilbage langs den indkommende (2). Et stykke hvidt karton (til observation af (3)) med et lille hul i (til passage af (2)) er her ret nyttigt. Det kræver for de fleste en del held (og gerne talent) at gøre det helt rigtigt første gang! Så bliv ikke overrasket hvis dette punkt kræver en indsats, begynd tæt ved det faste spejl og bevæg dig derefter ned mod linsen og derefter videre til det roterende spejl. To pletter ((1) og (3)) på det roterende spejl er i mange tilfælde nok til at udføre forsøget, men for at være sikker kan pletten følges tilbage til laseren hvor (4) bør dække (1) så længe det roterende spejl



står stille. Herefter indsættes beamsplitteren så (1) delvist sendes væk fra  $P$ , altså så (4) delvist sendes hen mod skærmen. Man bør nu kunne se en klar plet på et stykke hvidt papir indsat foran  $P$ . Verificer at det er en del af den reflekterede stråle ved feks. at sætte hånden ind i (2).

Check en ekstra gang at ingen piller ved det roterende spejl. Nu kan ledningerne fra overfræseren sættes i variotransformeren, der basalt set bare er en vekselspændingskilde med variabel styrke.

For at finde spejlets rotationsfrekvens,  $\nu$ , eller rettere lyspulsernes frekvens som er den dobbelte idet der er to spejle monteret, stilles en DrDAQs lysføler udenfor den benyttede strålegang. Roter spejlet indtil lyset rammer lysføleren i midten. Nu kan DrDAQ tændes med et digitalt oscilloskop der indstilles på 10 ms – pulsen ligner lidt en savtak-puls. Frekvensen kan nu måles ved at benytte frekvensanalysemuligheden i DrDAQ (View, New Spectrum som indstilles med max. ved 1000 Hz). Ved omkring 240 V fås typisk en puls-frekvens på ca. 1 kHz og der observeres mange højere harmoniske frekvenser. Plettens (4) flytning på skærmen kan registreres ved at fotografere pletten med web-kameraet. Det gøres lettest i mørke idet plettens intensitet bliver meget lav! Husk at fotografere hvor pletten er når det roterende spejl står stille samt at fotografere en lineal så forskydningen kan måles i mm. En lineær regression af data-punkterne (hvor forskydningen ved frekvens 0 med rimelighed kan tvinges til at være 0) giver lysets fart udfra

$$c = 2 d_{FR} 2\pi f 2 d_{PR}/s = 24\pi f d_{PR}^2/s$$

hvor  $f$  er rotationsfrekvensen og  $s$  er flytningen af laserpletten på skærmen,  $P$ . Dette resultat fremkommer idet spejlet roterer vinklen  $\varphi$  mens lyset tilbagelægger afstanden  $2 d_{FR}$  i tiden  $t = \varphi/2\pi f$  og flytningen er  $s = 2d_{PR}\varphi$  (2-tallet fordi indgangsvinkel=udgangsvinkel) hvor  $d_{OR} = d_{PR}$ . Hvis  $s$  afbildes som funktion af  $f$  fås  $c$  derfor fra hældningen udfra  $c = \alpha 24\pi d_{OR}^2$ , hvor  $\alpha$  er hældningskoefficienten. Typiske værdier for  $s$  er nogle få mm.

Tabelværdien for lysets fart er: 299 792 458 m/s og da den er defineret således er den eksakt.

Ulrik I. Uggerhøj

Institut for Fysik og Astronomi

Århus Universitet

(ulrik@phys.au.dk)